

## Экранирование переменного магнитного поля пленками и монокристаллами высокотемпературных сверхпроводников

© Т.М. Бурбаев, Г.А. Калюжная, В.А. Курбатов, В.С. Ноздрин, Н.А. Пенин

Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук,  
117924 Москва, Россия

(Поступила в Редакцию 17 апреля 1996 г.

В окончательной редакции 6 августа 1996 г.)

Предложена методика измерения эффективности экранирования переменного магнитного поля сверхпроводящими пленками с применением полосковой линии в качестве источника переменного магнитного поля в широкой области частот. Исследована зависимость эффективности экранирования переменного магнитного поля пленками YBCO и монокристаллами BiSrCaCuO от температуры и частоты изменения магнитного поля, направленного перпендикулярно плоскости образца, в интервале частот от  $10^4$  до  $10^9$  Hz. Показано, что зависимость эффективности экранирования от температуры и частоты изменения магнитного поля существенно зависит от метода изготовления пленок.

Наряду с методом определения критической температуры высокотемпературных сверхпроводников по зависимости сопротивления от температуры на постоянном токе используются методы измерения  $T_c$  на переменном токе, например, по зависимости индуктивности соленоида с помещенным в него сверхпроводниковым образцом от температуры или по эффекту экранирования магнитного поля сверхпроводящей пленкой. Однако в случае тонких сверхпроводящих пленок (2D) или слоистых сверхпроводников критическая температура, определенная из измерений эффективности экранирования, зависит от частоты изменения магнитного поля [1,2], что было объяснено кинетикой образования и распада пар вихрей в тонких пленках [3]. Кроме того, зависимость глубины проникновения от частоты наблюдалась на толстых пленках YBCO в области частот от 1 kHz до 1 MHz [4]. Исследование влияния частоты изменения магнитного поля на эффективность экранирования сверхпроводящих образцов производилось либо в относительно узких интервалах частот, либо на сверхвысоких частотах. Цель настоящей работы состояла в исследовании влияния частоты изменения магнитного поля в широком интервале частот от  $10^4$  до  $10^9$  Hz на форму кривой перехода, полученной по зависимости эффективности экранирования переменного магнитного поля от температуры у сверхпроводящего монокристалла BiSrCaCuO и у пленок YBCO, изготовленных разными методами.

### 1. Экспериментальная техника и образцы

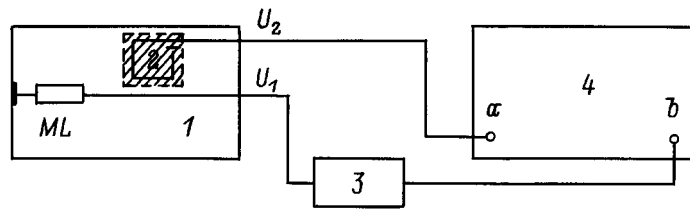
В качестве источника переменного магнитного поля использовалась симметричная полосковая линия, нагруженная на согласованное сопротивление и связанная с помощью петли с селективным вольтметром (рис. 1). При измерениях петля связи закрывалась

исследуемым образцом, размеры которого превышали размеры петли. Переменное магнитное поле было направлено перпендикулярно поверхности пленки. Наведенные в пленке вихревые токи вызывали изменение коэффициента связи  $K = U_2/U_1$  и, следовательно, напряжения  $U_2$ , создаваемого переменным магнитным полем в петле связи. Эффективность экранирования оценивалась по уменьшению коэффициента передачи  $K$ , возникающему при переходе образца в сверхпроводящее состояние.

Калибровка изменения коэффициента передачи в результате экранирования переменного магнитного поля производилась путем сравнения уменьшения коэффициента передачи при внесении в одном случае сверхпроводящего, а в другом — металлического экрана. В качестве металлического экрана использовалась медная фольга толщиной 0.05 mm. Такой экран при комнатной температуре обеспечивал полное экранирование переменного магнитного поля на частотах выше 1 MHz, в то время как экранирующие свойства сверхпроводящих образцов при  $T < T_c$  оставались постоянными вплоть до минимальной использованной частоты  $10^4$  Hz. Максимальная величина изменения коэффициента передачи при внесении идеально экранирующего образца определялась конструктивными особенностями устройства и размерами исследуемых образцов и в лучшем случае достигала 12 dB.

Температурная зависимость напряжения на петле связи  $U_2$  (при  $U_1 = \text{const}$ ) измерялась на разных частотах в диапазоне от  $10^4$  до  $10^9$  Hz. Используемые величины тока в полосковой линии при измерениях не превышали  $10^{-4}$  A, что дает оценку максимальной величины магнитного поля, пронизывающего образец, меньше  $10^{-8}$  T. При этих значениях поля полученные результаты не зависели от величины поля.

Нами исследовались пленки типа YBCO, изготовленные методом лазерного напыления на подложках

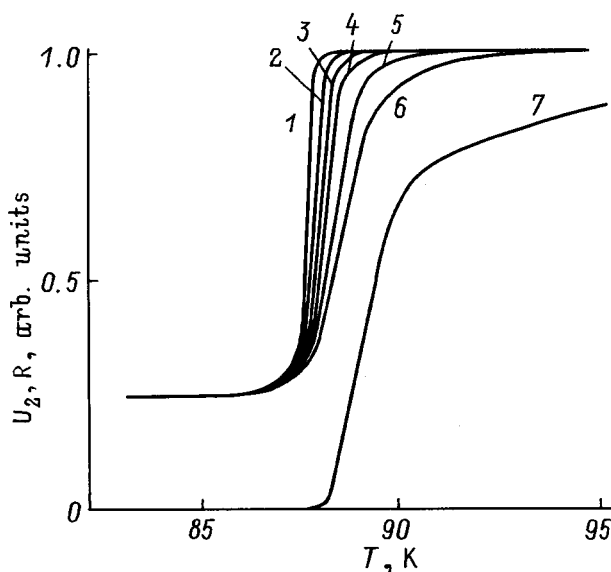


**Рис. 1.** Схема измерений эффективности экранирования переменного магнитного поля сверхпроводниковым образцом в широком диапазоне частот ( $10^4$ – $10^9$  Hz). 1 — полосковая линия с петлей связи, 2 — исследуемый образец, 3 — аттенюатор (TR1-50N-20), 4 — селективный вольтметр (SMV 11, SMV 8.5), *a* — вход приемника, *b* — выход калибровочного генератора.

из титаната стронция [5], толщиной  $1500 \text{ \AA}$ , и изготовленные методом ионно-лучевого распыления [6] на подложке из  $\text{ZrO}_2$ , стабилизированного иттрием; последние имели толщину  $500 \text{ \AA}$ . Отметим, что в использованном диапазоне частот электрические свойства подложек ( $\epsilon$ ,  $\text{tg}\delta$ ) практически не влияли на результаты. При измерениях эффективности экранирования магнитного поля монокристаллами  $\text{BiSrCaCuO}$  диаметр петли связи с линией составлял  $0.5 \text{ mm}$ , и изменение коэффициента передачи при сверхпроводящем переходе составляло величину  $1 \text{ dB}$ .

## 2. Результаты и обсуждение

На рис. 2 показаны температурные зависимости сигнала  $U_2$ , измеренные на разных частотах изменения магнитного поля, и зависимость сопротивления пленки, измеренного на постоянном токе, для одной из пленок типа YBCO, изготовленных методом ла-



**Рис. 2.** Температурные зависимости  $U_2$  (1–6) и сопротивления пленки на постоянном токе (7) для пленки YBCO, изготовленной лазерным напылением. Частоты изменения магнитного поля (МГц): 1 — 0.01, 2 — 1, 3 — 30, 4 — 100, 5 — 300, 6 —  $10^3$ .

зерного напыления [5]. Как видно из этого рисунка, с увеличением частоты происходит рост температуры  $T_\omega$ , при которой по мере уменьшения температуры пленки начинается уменьшение напряжения  $U_2$  на петле связи, т. е. возникает эффект экранирования. Вместе с тем при постоянной температуре с увеличением частоты эффективность экранирования увеличивается (уменьшается напряжение  $U_2$ ).

На рис. 3 приведены аналогичные зависимости сигнала  $U_2$  для пленки типа YBCO, полученной методом ионно-лучевого напыления [6], не подвергнутой дополнительной тепловой обработке (кривые 1–7). Отметим, что полному экранированию в этом случае соответствует величина относительного сигнала  $K = 0.45$ .

Из приведенных данных следует, что зависимости сигнала  $U_2$  от температуры на разных частотах у обеих разновидностей пленок имеют общий характер: крутизна изменения эффективности экранирования от температуры возрастает с уменьшением частоты. Однако этот эффект сильнее выражен у пленок, изготовленных методом лазерного напыления. При уменьшении частоты переменного магнитного поля зависимость  $U_2$  от температуры приобретает пороговый характер: наиболее крутые части кривых зависимостей  $U_2$  от температуры перестают зависеть от температуры по мере уменьшения частоты переменного магнитного поля.

Аналогичные измерения, выполненные на монокристаллических образцах типа  $\text{BiSrCaCuO}$ , толщина которых, как минимум, на два порядка превышала толщины исследованных пленок YBCO, показали, что зависимость сигнала  $U_2$  для монокристалла имеет схожий характер с подобными зависимостями для пленок. Однако у монокристалла вид зависимости эффективности экранирования от температуры почти не зависит от частоты; кривые смещаются по температуре без существенного изменения формы (рис. 4).

На рис. 3 представлены также температурные зависимости сигнала  $U_2$ , измеренные на различных частотах, для пленки YBCO, изготовленной методом ионно-лучевого напыления и подвергнутой отжигу в атмосфере кислорода при температуре  $500 \text{ K}$  (кри-

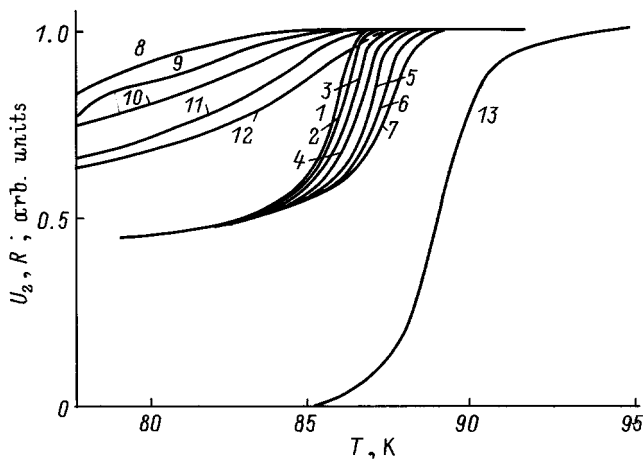


Рис. 3. Температурная зависимость  $U_2$  (1–12) и сопротивления на постоянном токе (13) для пленки YBCO, изготовленной ионно-лучевым напылением. 1–7 — до отжига в диапазоне частот от 10 кГц (1) до 1 ГГц (7); 8–12 — после отжига в диапазоне частот от 1 МГц (8) до 1 ГГц (12).

вые 8–12). Там же приведена зависимость сопротивления отожженной пленки от температуры, измеренная на постоянном токе. Из этих данных следует, что в результате отжига пленки существенно ослабли температурные зависимости  $U_2$  на всех использованных частотах и уменьшилась эффективность экранирования переменного магнитного поля.

Наблюдаемые изменения температурных зависимостей эффективности экранирования с изменением частоты переменного магнитного поля аналогичны изменениям эффективности экранирования, полученным одно- и двухкатодными методами на аналогичных пленках типа YBCO [1,2]. В этих работах результаты исследований были объяснены на осно-

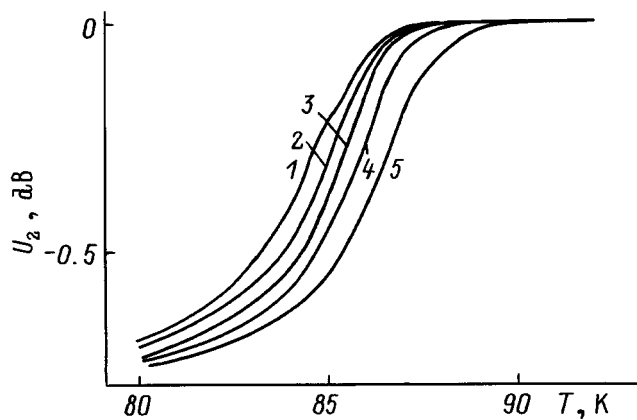


Рис. 4. Зависимость  $U_2$  от температуры для монокристалла BiSrCaCuO. Частоты изменения магнитного поля (МГц): 1 — 1, 2 — 30, 3 — 100, 4 — 300, 5 — 10<sup>3</sup>.

ве эффекта образования вихрей в тонких пленках. Согласно [3], в тонких двумерных сверхпроводящих пленках возникают термически возбужденные вихри, которые связываются в пары с противоположными направлениями вращения (тока) при  $T < T_v$  и диссоциируют на свободные вихри при  $T > T_v$ , где  $T_v$  — температура, характеризующая энергию связи вихрей; при этом  $T_v < T_c$ . Под действием переменного магнитного поля происходит переориентация (поляризация) взаимодействующих вихрей. Как следствие при заданной температуре импеданс сверхпроводящей пленки и, следовательно, эффективность экранирования магнитного поля пленкой зависят от концентрации связанных в пары и свободных вихрей и от частоты изменения магнитного поля.

Очевидно, что усиление экранирования с увеличением частоты изменения магнитного поля при постоянной температуре и соответствующее увеличение  $T_w$ , наблюдаемое у исследованных нами сверхпроводящих образцов, также можно приписать влиянию кинетики возникновения и распада вихрей. Эффект увеличения максимальной крутизны зависимости эффективности экранирования с уменьшением температуры и частоты переменного магнитного поля требует более детальных дальнейших исследований.

В заключение отметим, что эффективность экранирования переменного магнитного поля высокотемпературными сверхпроводящими пленками зависит от метода изготовления пленок.

Измерение температурно-частотных зависимостей эффективности экранирования в широкой области частот с использованием полосковой линии в качестве источника переменного магнитного поля может быть одним из методов контроля и исследования свойств сверхпроводящих пленок, не требующим создания контактов на исследуемых образцах.

Работа поддержана Российской научно-технической программой "Высокотемпературная сверхпроводимость" (проект № 930016).

## Список литературы

- [1] A.T. Fiory, A. Hebard, P.M. Mankievich, R.E. Howard. Phys. Rev. Lett. **61**, 1419 (1988).
- [2] V.A. Gasparov. Physica **C178**, 449 (1991).
- [3] V. Ambegaokar, B.I. Halperin, D.R. Nelson, E.D. Siggia. Phys. Rev. Lett. **40**, 783 (1978).
- [4] A.C. Bodi, T. Kokkomki, S. Leppavuori, J. Vayrynen. Physica **C253**, 115 (1995).
- [5] A.I. Golovashkin, E.V. Ekimov, S.I. Krasnosvobodtsev et al. Physica **C162–164**, 715 (1989).
- [6] A.V. Bagulya, I.P. Kazakov, M.A. Negodaev, V.L. Tsekhosh, V.V. Voronov. Mater. Sci. Eng. **21**, 5 (1993).